

# PERFORMANCE ANALYSIS OF REAR AXLE SEMIACTIVE SUSPENSION OF THE CAR WITH PREVIEW CONTROL

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУАКТИВНОЙ ПОДВЕСКИ ЗАДНЕГО МОСТА АВТОМОБИЛЯ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО АЛГОРИТМУ ПРЕДСКАЗАНИЯ

Mazhei A., Dr. Eng Rakitsky A.

Scientific-Engineering Republican Unitary Enterprise

"Belavtotractorbuilding" – Minsk, Belarus

E-mail: mazhei@mail.ru, a\_antonrakitsky@yahoo.com

### Резюме

Сформулирована проблема компромисса при проектировании подвески автомобиля и приведен обзор методов ее решения. Проведен анализ теоретических и экспериментальных исследований алгоритмов управления подвеской с управляемыми амортизаторами. Описана методика исследования в среде Adams/Car управляемости и комфорта автомобиля, оборудованного подвеской заднего моста с управляемыми амортизаторами, работающими по алгоритму предсказания. Результаты моделирования маневра “переставка”, выполненного на дороге с неровным профилем свидетельствуют о том, что алгоритм с предсказанием позволяет обеспечить улучшение управляемости и степени комфорта автомобиля с управляемыми амортизаторами по сравнению с традиционной подвеской.

### 1. Введение

Подвеска с жесткими амортизаторами (в дальнейшем – жесткая подвеска) обеспечивает хорошую устойчивость транспортного средства, однако в большей степени передает неровности дороги на пассажиров и снижает уровень их комфорта. Напротив, подвеска с мягкими амортизаторами (мягкая подвеска) позволяет получить более комфортную езду, но снижает управляемость транспортного средства. Поэтому каждая конкретная конструкция подвески есть результат компромисса между управляемостью и комфортом.

Традиционная подвеска транспортного средства содержит нерегулируемые амортизаторы с постоянным коэффициентом демпфирования. В дальнейшем мы будем называть такие амортизаторы “пассивными”.

Для улучшения параметров было предложено использовать активную подвеску, в которой специальный привод создает усилие, противоположное по знаку и равное по величине вибрационным нагрузкам. Такая система для своей работы требует больших затрат энергии и в большинстве случаев непрактична. Кроме того, если в системе активной подвески возникнет неисправность, имеется вероятность, что транспортное средство останется без демпфирующего устройства и потеряет устойчивость на дороге.

Более практичной подвеской по сравнению с активной является полуактивная подвеска. В полуактивной подвеске в отличие от активной вместо генератора силы используется амортизатор, но он не является пассивным, а позволяет изменять коэффициент демпфирования при приложении управляющего воздействия. Полуактивная подвеска обладает близкими к активной подвеске характеристиками, при этом расходуется значительно меньше энергии. Кроме того, полуактивная подвеска сохраняет некоторые демпфирующие свойства в случае исчезновения питания, что делает ее более безопасной по сравнению с активной подвеской.

Эффективность полуактивной подвески в значительной степени определяется системой управления, работающей по заданному алгоритму.

### 2. Выбор объекта исследования

Для управления полуактивной подвеской используются различные алгоритмы управления. Наиболее исследованным и широко описанным в литературе является так называемый “skyhook” алгоритм. Алгоритм “skyhook” подразумевает, что амортизатор располагается между поддрессоренной массой и бесконечно инерционной массой – небом (отсюда название

“skyhook” – небесный крюк). Конечно, такое представление не вполне соответствует действительности, поскольку в реальном транспортном средстве амортизатор располагается между двумя движущимися телами – поддрессоренной и неподдрессоренной массами, и идеальный “skyhook” невозможен. Поэтому к нему стремятся в наиболее возможной степени.

Это достигается тем, что коэффициент демпфирования амортизатора увеличивается, когда его усилие совпадает с усилием идеального “skyhook” амортизатора, и уменьшается до минимума, когда эти усилия противоположны.

Большинство работ, посвященных полуактивной подвеске и ее применению на автомобиле основаны на результатах моделирования, а не реального эксперимента. Получаемые в результате моделирования результаты позволяют говорить об улучшении производительности подвески автомобиля после замены традиционных пассивных амортизаторов на управляемые. В то же время экспериментальные результаты часто оставляют неоднозначное впечатление. В работе [1], где четыре управляемых по методу “skyhook” амортизатора были установлены на трехосный седельный тягач Volvo, не было отмечено существенного улучшения вибрационных характеристик в кабине водителя. Такое расхождение теории и эксперимента вызвано тем, что для переключения амортизатора требуется время, а управляющие алгоритмы, в т.ч. “skyhook” требуют мгновенного отклика на перемещения поддрессоренной и неподдрессоренной масс. Последнее касается как магнитореологических и электрореологических амортизаторов, так и гидравлических с сервоклапаном.

В связи с вышеизложенным, предпринимаются исследования управляющих алгоритмов с элементами предсказания (Preview Control). Основная их идея заключается в том, что управляющее воздействие на амортизатор подается с опережением на 10-50 мс, чтобы последний смог настроиться под предстоящую неровность дороги. Предсказание профиля дороги может быть основано на данных, получаемых с датчиков вертикальных ускорений колес переднего моста (передний мост в этом случае оснащается обычной пассивной подвеской) или путем сканирования дорожной поверхности впереди транспортного средства. В работе [2] на экспериментальной модели, имитирующей двухосное транспортное средство с датчиками ускорения, было отмечено снижение величины среднеквадратичного ускорения поддрессоренной массы над задним ведущим мостом на 16%.

Для исследования свойств полуактивной подвески с алгоритмом предсказания нами предлагается выбрать наиболее

простой вариант, который, тем не менее, заслуживает тщательного рассмотрения. На колесах переднего моста модели установлены датчики вертикальных ускорений. После регистрации на колесах переднего моста ускорений, превышающих заданный порог чувствительности ( $4 \text{ м/с}^2$ ), через рассчитанный промежуток времени амортизаторы заднего моста переводятся в “мягкий” режим. Величина задержки определяется алгоритмом исходя из скорости движения автомобиля и времени отклика амортизаторов. С одной стороны, амортизаторы заднего моста обязательно должны успеть переключиться с “жесткой” характеристики на “мягкую” до того момента как колеса заднего моста встретят дорожную неровность. С другой стороны, время работы амортизаторов в “мягком” режиме на ровной дороге желательно уменьшать в наиболее возможной степени, что позволит улучшить управляемость автомобиля и погасить его продольные и поперечные колебания. Основной принцип работы алгоритма предсказания можно сформулировать как “чем позже перейти на “мягкую” характеристику амортизаторов тем лучше, но главное – не опоздать”, потому что нормальным режимом работы амортизаторов заднего моста является “жесткий”, при котором дорожные неровности вызывают большие вертикальные ускорения и резко снижают комфорт. Таким образом, на неровностях задняя подвеска является мягкой, а на ровной дорожной поверхности – жесткой, что позволяет устранить компромисс между комфортной ездой и устойчивостью.

В качестве базовой характеристики амортизатора для исследований используем характеристику амортизатора легкового автомобиля. Под жесткой характеристикой будем понимать характеристику, полученную из базовой характеристики умножением на 1.2. Соответственно, мягкую характеристику получим умножением базовой характеристики на 0.4. Величины 1.2 и 0.4 назовем коэффициентами относительной жесткости амортизатора по отношению к базовому и обозначим  $K=1.2$  и  $K=0.4$ . Жесткие амортизаторы быстрее гасят колебания автомобиля, уменьшают крены, что ведет к улучшению управляемости. Однако неровности дороги вызывают большие значения вертикальных ускорений, снижающих комфорт. Мягкие амортизаторы эффективнее гасят вертикальные ускорения неровностей дороги, но автомобиль подвержен раскачиванию на дороге и сильным кренам.

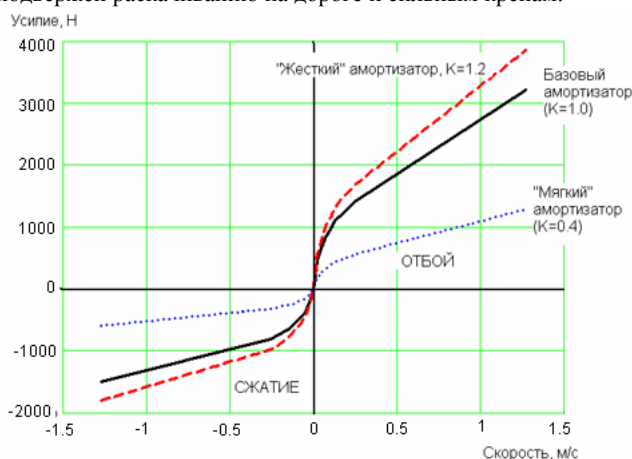


Рис. 1. Характеристики амортизаторов для исследования

Задачей исследования является изучение возможности соединения достоинств жесткой и мягкой характеристики управляемого амортизатора при его своевременном переключении управляющим алгоритмом предсказания.

### 3. Методика исследования

Для исследования была создана в среде ADAMS/Car модель легкового автомобиля, состоящая из следующих подсистем:

- TR\_Body – кузов легкового автомобиля,
- TR\_Brake\_System – тормозная система,

- TR\_Front\_Tires – передние колеса,
- TR\_Rear\_Tires – задние колеса,
- TR\_Powertrain – двигатель и трансмиссия,
- TR\_Steering – рулевое управление,
- TR\_Front\_Suspension – передняя подвеска,
- TR\_Rear\_Suspension – задняя подвеска.

Наиболее интересующие нас в данном исследовании подсистемы передней и задней подвесок основаны на шаблоне `_double_wishbone.tpl`. Этот шаблон содержит конструкцию независимой рычажной подвески, которую мы применим как для переднего, так и для заднего моста. При этом подвеска переднего моста модели автомобиля оснащена традиционными пассивными амортизаторами ( $K=1.0$ ) и в процессе сравнительных исследований оставалась неизменной, а подсистема задней подвески последовательно оборудовалась пассивными амортизаторами с мягкой характеристикой ( $K=0.4$ ), пассивными амортизаторами с жесткой характеристикой ( $K=1.2$ ), полуактивной подвеской, работающей по алгоритму предсказания ( $K=0.4$  или  $1.2$ ). Замеры вертикальных ускорений, определяющих комфорт пассажиров, проводились в точках А – верхних креплениях амортизаторных стоек заднего моста.

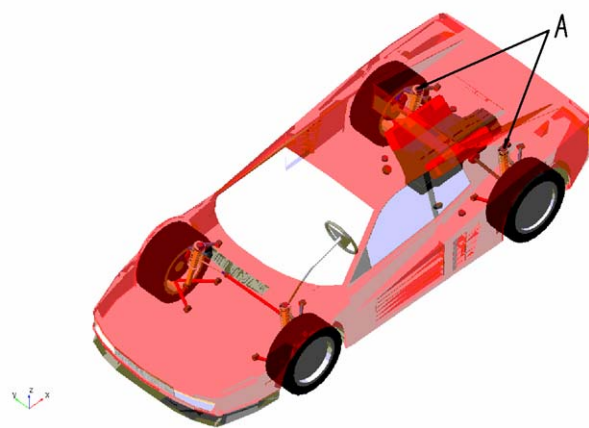


Рис. 2. Модель автомобиля в среде Adams/Car

Средствами Adams/Car невозможно запрограммировать алгоритм работы полуактивной подвески с предсказанием. Однако пакет Adams позволяет организовать подключение и вызов скомпилированных сторонних подпрограмм, написанных на Фортране или Си. Нами было создано два модуля, которые вошли в состав шаблона полуактивной подвески с алгоритмом предсказания. Первый модуль осуществляет запись в файл значений вертикальных ускорений на колесах переднего моста. Второй модуль на основе передаваемых сведений о скорости движения автомобиля и после чтения файла вертикальных ускорений переднего моста прогнозирует профиль дороги на 10-30 см вперед и определяет требуемое значение относительной жесткости амортизаторов заднего моста. Прогнозирование осуществлялось отдельно для левых и правых колес. Обмен данными между Adams/Solver и подключенными модулями организован при помощи функции Adams/Solver VARSUB. При моделировании учитывалось время отклика амортизатора на управляющее воздействие. Величина этой задержки составляет примерно 0.05 с.

Средства Adams/Car позволяют провести различные виртуальные испытания созданной модели автомобиля. Перед нами стояла задача выбрать условия и метод испытаний, позволяющие определить способность полуактивной подвески обеспечивать как комфорт при движении по дорожным неровностям, так и устойчивость автомобиля на дороге. Выбор маневра “переставка” на дороге с неровностями объясняется следующими причинами.

1. Дорожные неровности позволяют выяснить способность подвески обеспечивать комфорт исходя из значений вертикальных ускорений точек А.
2. Выполнение маневра “переставка” на большой скорости предъявляет к подвеске жесткие требования в отношении сопротивления крену автомобиля.
3. Раскачивание автомобиля после проезда неровности отрицательно влияет на возможность выполнения маневра “переставка”.

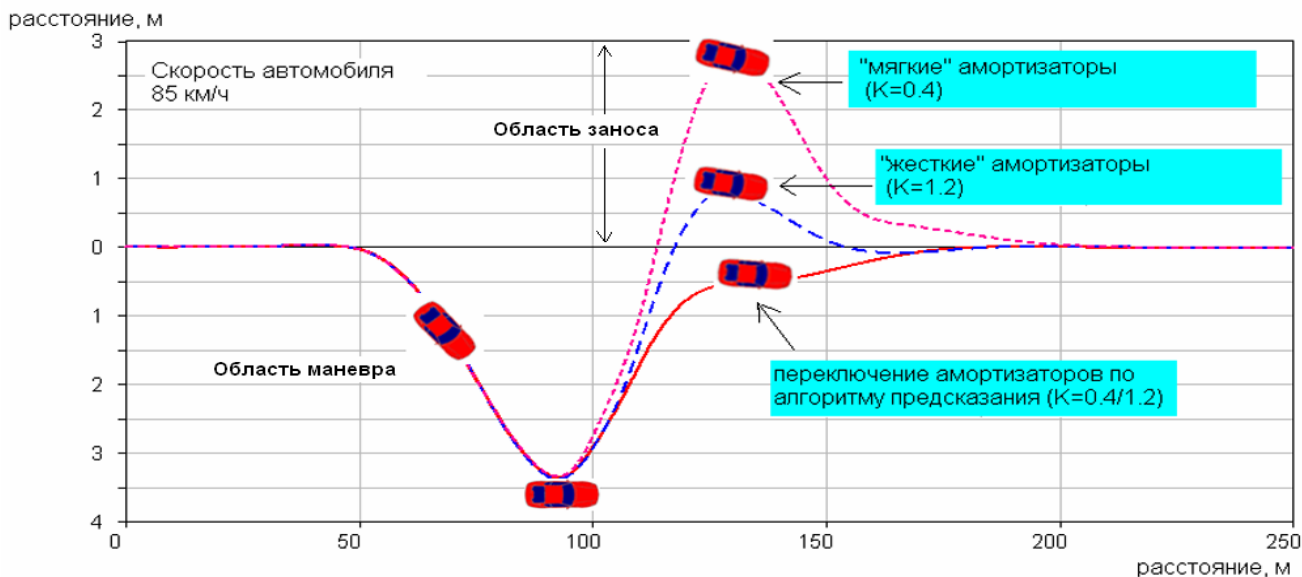


Рис.3. Выполнение маневра “переставка”

Для большей наглядности результаты маневра “переставка”, который регламентируется стандартом ИСО-3888, был модифицирован в сторону усложнения. Расстояние движения в соседней полосе было ограничено 12 метрами. Скорость движения 85 км/ч. Таким образом, на неровной дороге автомобиль перестраивался в соседнюю полосу движения и практически сразу возвращался обратно.

#### 4. Результаты исследования

Траектория движения автомобиля с полуактивной подвеской, работающей по алгоритму предсказания, и траектории движения автомобилей с пассивными подвесками приведены на рис.3. Программа движения модели предусматривала симметричные начало и окончание маневра “переставка”. Отклонение траектории от симметричности характеризует склонность автомобиля к заносу и управляемость автомобиля. Хорошо заметно, что автомобиль с мягкой подвеской, обеспечивающей комфорт, значительно проигрывает жесткой подвеске в управляемости. Значительные крены в поперечной плоскости и раскачивание автомобиля в продольной плоскости после проезда неровности не лучшим образом сказываются на управляемости.

На рис.4а и рис. 4б. приведены графики продольных и поперечных колебаний автомобиля. Видно, что кратковременное переключение амортизаторов заднего моста с жесткой характеристики на мягкую при проезде неровностей практически не изменяет характера подвески. Он остается “жестким”, спортивным. Этим объясняется и хороший результат при выполнении маневра “переставка”. Более того, полуактивная подвеска, которая переключается между мягкой и жесткой характеристиками, может даже улучшить управляемость по сравнению с жесткой подвеской, что заметно на рис.3 и рис 4б.

Основное преимущество мягкой подвески – небольшие значения вертикальных ускорений поддрессоренной массы, которые являются одним из критериев комфорта автомобиля. Графики вертикальных ускорений точки А – штока левого заднего амортизатора рассматриваемой полуактивной подвески и традиционной мягкой подвески приведены на рис.5.

На рис.5 хорошо заметно, что полуактивная подвеска снижает вертикальные ускорения даже в большей степени, чем традиционная мягкая подвеска. Это объясняется переключением амортизатора на жесткую характеристику после проезда неровности. При этом колебания кузова и связанные с ними вертикальные ускорения быстро погашаются.

График переключений левого заднего амортизатора приведен на рис.6. Управляющий алгоритм с предсказанием в принципе

не предъявляет жестких требований к быстродействию управляемого амортизатора. Используемое в расчетах время отклика 50 мс обеспечивает работу алгоритма на автомобиле с базой 2.5 мм на скорости до 170-180 км/ч. Современные управляемые амортизаторы обладают более высоким

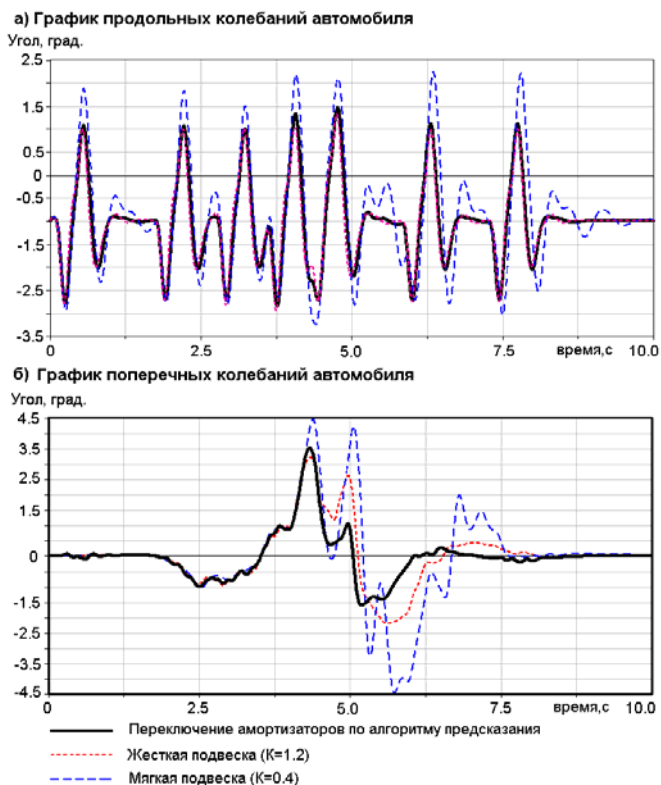


Рис. 4. Графики продольных и поперечных колебаний автомобиля

быстродействием со временем отклика от 15 мс [3].

Таким образом, полуактивная подвеска с алгоритмом предсказания позволяет получить сочетание достоинств жесткой и мягкой подвесок. Как было показано выше, такая полуактивная подвеска ничем не уступает жесткой подвеске по способности обеспечить хорошую управляемость автомобиля и не уступает мягкой подвеске по уровню комфорта пассажиров. Таким образом, исследование показало возможность соединения достоинств жесткой и мягкой подвесок автомобиля при использовании полуактивной подвески с управляющим алгоритмом предсказания.

Другие достоинства управляющего алгоритма с предсказанием:

1. Значительное упрощение и удешевление конструкции полуактивной подвески. Алгоритм "skyhook" (и большинство подобных) требуют в качестве входных параметров абсолютные скорости как подрессоренной массы, так и неподдресоренной. Это означает, что требуется в два раза больше датчиков ускорений.
2. Алгоритм в качестве входных данных использует значения ускорений. Поэтому отсутствует накопление ошибок датчика ускорения при интегрировании его показаний с целью получения значения вертикальной скорости.
3. Отсутствие жестких требований к быстродействию амортизатора.

передних колес, например, на поворотах, или при различных размерах колеи, а также при движении задним ходом. В этих случаях необходимо предусмотреть возможность его "перекрытия" режимом работы обычной пассивной подвески по промежуточной характеристике (например, с коэффициентом относительной жесткости  $K$  равным единице). Необходимость включения "перекрытия" должна определяться блоком управления исходя из степени соответствия реальных и предсказываемых вертикальных ускорений. Также алгоритм предсказания целесообразно отключать при большой скорости движения автомобиля, когда отсутствие непредвиденных водителем изменений жесткости задней подвески является более важным фактором, чем улучшение управляемости и комфорта.

## 5. Заключение

Проведенное исследование показало перспективность применения на автомобиле полуактивной подвески заднего моста, работающей по алгоритму предсказания. По сравнению с другими методами управления полуактивной подвеской алгоритм предсказания обладает важными преимуществами и позволяет объединить достоинства традиционных жесткой и мягкой подвесок.

вертикальное ускорение штока амортизатора,  $\text{m/s}^2$

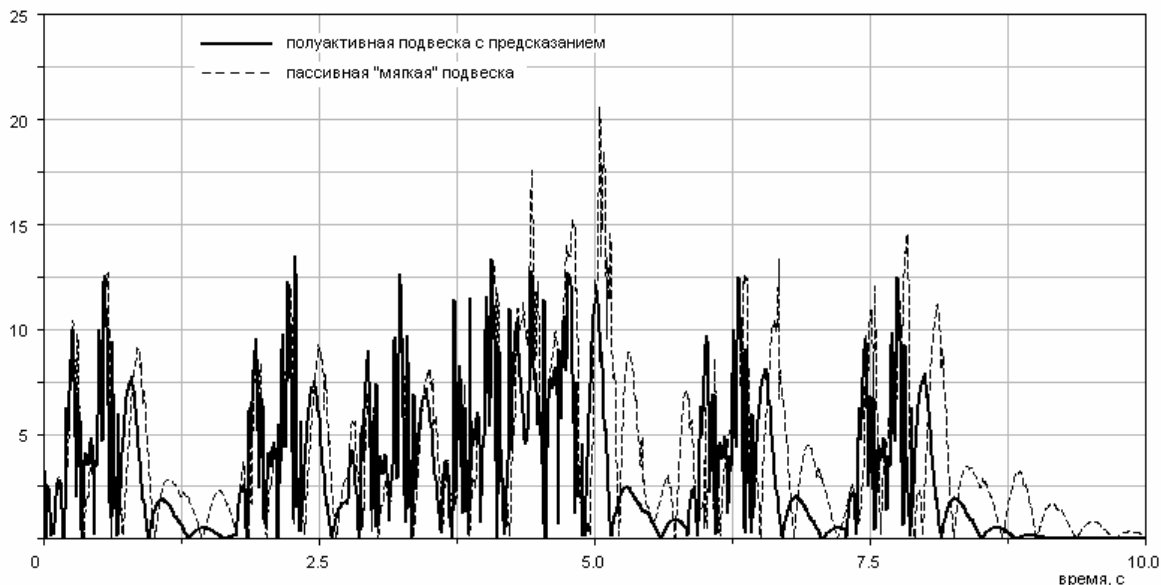


Рис.5. График вертикальных ускорений штока левого заднего амортизатора



Рис.6. График переключения характеристик левого заднего амортизатора

Недостатком алгоритма с предсказанием является невозможность его достоверной работы в том случае, когда траектория движения задних колес не совпадает с траекторией

## 6. Литература

1. David Simon, Mehdi Ahmadian. "Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspensions": Hemeroteca: Journal of Vibration and Acoustics July 2001 - Technical Papers, Vol. 123, n° 3, pp. 365-375.
2. Kitching, KJ, Cole, DJ, and Cebon, D. 'Performance of a Semi-Active Damper for Heavy Vehicles' ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol 122, No 3, Sept 2000, pp. 498-506.
3. Suspension and Damper Technology for Passenger Cars [online]. ZF Sachs AG, Schweinfurt, 2003 [cited 20 December 2003]. Available from World Wide Web: [http://www.zfsachs.com/owx\\_medien/media201/20126.pdf](http://www.zfsachs.com/owx_medien/media201/20126.pdf).